

## 「宇宙線ミュオン」が電子機器の誤作動を引き起こす ～超スマート社会の安全・安心を支えるソフトウェア評価技術の開発に向けて～

スマートフォンやパソコンだけでなく、冷蔵庫などの家電に至るまでコンピューターが搭載されるようになり、電子機器は私達の生活には欠かせないものとなりました。しかし、最近では、これら電子機器の誤作動を引き起こす原因の一つとしてソフトウェア<sup>注1)</sup>と呼ばれる現象が注目されています。ソフトウェアとは一過性の誤作動や故障のことで、その要因の一つは宇宙線<sup>注2)</sup>が電子機器に衝突して生じる半導体デバイスのビット情報反転<sup>注3)</sup>です。宇宙線は地上に降り注ぐ自然の放射線で、この正体は目に見えない中性子やミュオン<sup>注4)</sup>です。半導体デバイスの微細化・低消費電力化が進むにつれ、放射線耐性は低下しており、従来懸念されてきた宇宙線中性子ばかりでなく、宇宙線ミュオンによるソフトウェア発生の可能性も指摘されています。

九州大学大学院総合理工学研究院の渡辺幸信教授と大学院総合理工学府博士後期課程1年の真鍋征也、大阪大学大学院情報科学研究科の橋本昌宜教授と同博士後期課程3年の廖望ほか、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所、J-PARC センター、日本原子力研究開発機構 (JAEA) 原子力基礎工学研究センターの11名からなる共同研究チームは、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) 内のミュオン実験装置 MUSE にて、半導体デバイスに対する正および負ミュオン照射試験を行い、正ミュオンに比べて負ミュオンの方がメモリ情報のビット反転の発生確率が高くなることを実験的に初めて明らかにしました。

今回の実験で、ソフトウェア発生には半導体デバイス内に停止する低エネルギーミュオンによる影響が大きいこと、特に負ミュオンの方が正ミュオンより高い発生確率を示すことが明らかになりました。これは、負ミュオンの停止した場所での捕獲反応<sup>注5)</sup>に起因します。

負ミュオンの照射実験結果の報告はこれまでになく、ソフトウェアの正確な評価とそれに対する対策はIoT<sup>注6)</sup>の進展による超スマート社会の実現に寄与すると考えられます。今後は、さらに試験データを蓄積し、シミュレーション手法の精度を高めたソフトウェア発生率の評価技術確立し、その技術を次世代半導体デバイスの設計などに応用することで、自動運転やIoT分野の安心・安全な半導体技術の創出に貢献することが期待されます。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(16H03906)の助成を受けて行われました。

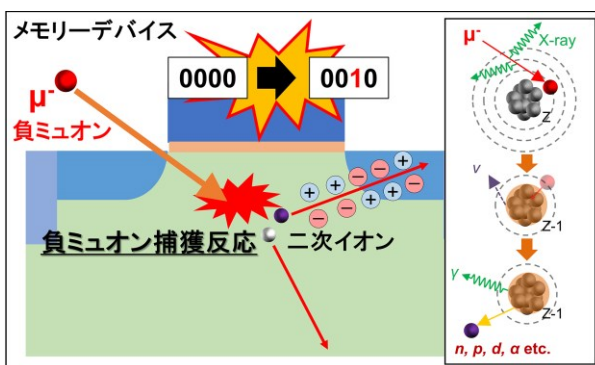
また、本研究成果は、2018年5月24日(木)(日本時間)に「IEEE Transaction on Nuclear Science 誌(電子版)」に掲載されました。

### 研究者からひとこと：

宇宙線によるソフトウェア対策の重要性が指摘されています。本研究成果に基づいてエラー発生機構をさらに解明し、発生率の正確な評価とその対策に貢献する技術開発を進めていきます。



本共同実験チームのメンバー



### (参考図)

負ミュオンが半導体メモリデバイスに入射し、負ミュオン捕獲反応で発生した二次イオン(陽子やヘリウム等)により電荷が付与されて、ビット情報反転が生じる現象の模式図

【お問い合わせ】九州大学大学院総合理工学研究院 教授 渡辺 幸信

電話:092-583-7601 FAX:092-583-7601 Mail:watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp

大阪大学大学院情報科学研究科 教授 橋本 昌宜

電話:06-6879-4520 FAX:06-6879-4524 Mail:hasimoto@ist.osaka-u.ac.jp

### 【研究成果のポイント】

- 電子機器の誤作動を引き起こす原因の一つとしてのソフトウェアの現象が注目されている。
- ソフトエラーの原因として宇宙線中性子だけでなく宇宙線ミュオンの可能性も指摘されている。
- 今回の実験で低エネルギーミュオンによる影響(特に負ミュオン)が大きいことを明らかにした。
- 今後の安全安心な次世代半導体デバイス設計への応用に期待。

### 【研究の背景】

今日の高度情報化社会は、情報通信技術を用いて生み出される多くの高性能・多機能な電子機器によって支えられており、これらに誤作動が生じた場合、甚大な被害を引き起こされるリスクがあります。そのため、機器の性能向上に加えて、安心・安全の観点から信頼性の確保が重要となります。近年注目されている電子機器の誤作動の原因の一つにソフトウェアと呼ばれる現象があります。ソフトウェアとは電子機器が放射線(宇宙線)に曝された際に生じる一過性の誤作動や故障のことです。宇宙線は絶えず地上に降り注いでいて、その宇宙線のうち、主要な成分(荷電粒子の約75%)はミュオンです。ミュオンは透過力が高いので、電子機器の中にも到達します。

半導体デバイスの微細化・低消費電力化が進むにつれ、半導体デバイスの放射線耐性は低下しており、従来から懸念されて対策が進んでいる宇宙線中性子ばかりでなく、宇宙線ミュオンに起因するソフトウェア発生の可能性も指摘され始めています。これまで正ミュオン照射実験結果の報告は数例ありましたが、負ミュオン照射試験の報告はありませんでした。先行のシミュレーション研究により、負ミュオンは原子核に捕獲される物理過程により正ミュオンよりソフトウェアの影響が大きいことが予想されており、その実験的検証が強く望まれていました。

### 【研究手法と成果】

本研究では、J-PARC MLF内のミュオン実験装置 MUSE で発生可能な世界最高強度の正および負ミュオンビームを用いて、半導体デバイスの照射試験を行いました。本試験には、65nm 設計ルール<sup>注7)</sup>の12メガビットSRAM(Static RAM)に低エネルギーミュオン(運動量34~44MeV/c)を照射し、入射運動量やデバイス印加電圧を変えて、メモリセルのビット反転発生確率を測定しました。その結果(図1参照)、ミュオンがデバイスの有感領域内に停止する入射運動量領域で、負ミュオンの方が正ミュオンに比べてビット反転発生率が高くなることを実験的に初めて観測しました。粒子・重イオン輸送計算コード PHITS<sup>注8)</sup>を用いたデバイス内のミュオン挙動シミュレーション結果と比較することで、両者の差は、停止位置での負ミュオン捕獲反応により発生する二次軽イオン(陽子やヘリウム)と反跳核イオンによる局所的な電荷付与が、ミュオン自身の直接電離による電荷付与に比べて十分大きいことが影響していることを明らかにしました。

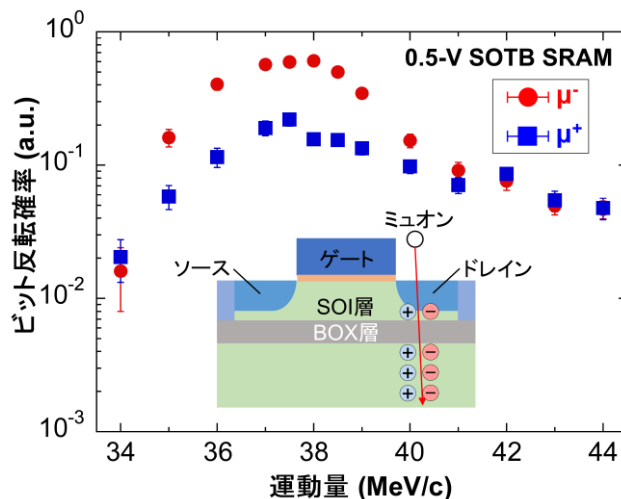


図1 SOTB(silicon on a thin buried oxide)構造のSRAM(動作電圧:0.5V)に対する測定結果の一例。赤丸と青四角がそれぞれ、負ミュオンと正ミュオンによるビット反転確率(相対値)を示す。縦軸は対数表示。38MeV/cの運動量で入射したミュオンはメモリセルのトランジスタ領域近傍に停止し、大きな電荷を付与することでビット反転を引き起こす。負ミュオンは停止位置で原子核に捕獲され二次イオンを生成するために、正ミュオンに比べて約4倍大きな発生確率を示している。

## 【今後の期待】

放射線による半導体デバイスの誤作動は確率的に稀にしか起こらない現象ですが、IoT の普及とともに世界中で膨大な数の半導体デバイスが使われているため、今後、発生数が増えることが予想されます。特に、社会インフラを支えている電子機器内でいったん誤作動がおこると、致命的な障害を起こす可能性があります。次世代半導体デバイスで顕在化が危惧されている宇宙線ミュオンに起因するソフトエラーの発生機構を実験・シミュレーションによりさらに解明し、エラー率推定のための基盤技術（国内ミュオン施設を活用した試験技術と先端シミュレーション技術）を開発していきます。開発された基盤技術を次世代半導体デバイスの設計などに応用することで、車の自動運転や IoT 分野の安心・安全な半導体技術の創出に貢献することが期待されます。

今後は、産学共創プラットフォーム共同研究開発推進プログラム (OPERA) の平成 29 年度採択課題「安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出」（領域統括：大阪大学核物理研究センター・中野貴志教授）の中で、本共同研究メンバーが研究開発課題「半導体ソフトエラー評価技術の確立」に参画して、本研究成果をさらに発展させていく予定です。

## 【用語解説】

### 注 1) ソフトエラー

ソフトエラーとは、電子機器中のメモリ等の半導体集積回路が何らかの原因で誤作動する現象のこと。回路に致命的なダメージを与えるハードエラーと違って一時的なものです。このソフトエラーは、地上まで到達する二次宇宙線(主として中性子)が大きな要因となっており、宇宙線がメモリセルに衝突した際にセルに蓄えられた電荷量の値を変化させることで、メモリ情報のビット反転(シングルイベントアップセット)を引き起こすことがメモリ誤作動の原因の一つとなっています。

### 注 2) 宇宙線

宇宙から地球へ降り注ぐ高エネルギー微小粒子(電子、陽子、光子など)や原子核(ヘリウム、鉄等)のこと。地球外からの宇宙線を一次宇宙線と呼びます。一次宇宙線は地球大気に入射し、空気原子と衝突し二次的に粒子(中性子、ミュオン、電子、ガンマ線等)が発生し、地表へやってきます。これらは二次宇宙線と呼ばれ、ミュオンは二次宇宙線中の荷電粒子の約 3/4 を占めます。

### 注 3) ビット情報反転

ビットとはコンピューターの中で扱うデータの最小単位のこと。”0”か”1”かという情報ひとつが1ビットです。数、文字、画像などの情報はすべてビットの組み合わせで表現されています。ここでは、コンピューターメモリ上に保存されているビット情報が何らかの原因で反転すること(すなわち”0”が”1”に、あるいは”1”が”0”に書き換わること)をビット情報反転と言います。

### 注 4) ミュオン

ミュオンは、電気素量に等しい電荷を持ち、電子の約 200 倍の質量を持つ、素粒子レプトンの一つです。ミュオンの平均寿命は  $2.2 \times 10^{-6}$  秒で、電子とニュートリノに崩壊します。電荷が正および負のミュオンが存在します。

### 注 5) 捕獲反応

物質中で負ミュオンが停止すると、原子核周りの原子軌道に束縛され、ミュオン原子が形成されます。その後、束縛された負ミュオンは最内殻の軌道に遷移し、ある割合(シリコンの場合は約 65%)で原子核に捕獲されます。その結果、原子核は励起されて、中性子や陽子などの二次粒子が放出されます。この物理過程は負ミュオン捕獲反応過程と呼ばれています。

### 注 6) IoT

Internet of Things (もののインターネット)の略で、身の回りの「もの」がすべてインターネットに繋がることを意味します。

### 注 7) 設計ルール

半導体集積回路は、回路線幅を細く素子を小さくすることで消費電力を下げ、高速動作(性能)を向上させるとともに、たくさんのトランジスタを集積することで高機能化してきました。この基本的な回路の線幅(図1のゲート長にほぼ相当)のことを設計ルールと呼びます。今回の照射試験では 65nm 設計ルールの SRAM を使用しました。最近ではさらに細線化が進み、10nm 程度になってきています。

注 8) PHITS

JAEA が中心となって開発を進めているモンテカルロ計算コードで、あらゆる物質中での放射線の振る舞いを第一原理的に計算することができます。放射線施設の設計、医学物理計算、宇宙線科学など、工学・医学・理学の様々な分野で利用されています。

参考 URL (<https://phits.jaea.go.jp/indexj.html>)

【論文情報】

タイトル : Negative and Positive Muon-Induced Single Event Upsets in 65-nm UTBB SOI SRAMs

著者名 : Seiya Manabe, Yukinobu Watanabe, Wang Liao, Masanori Hashimoto, Keita Nakano, Hikaru Sato, Tadahiro Kin, Shin-ichiro Abe, Koji Hamada, Motonobu Tampo, Yasuhiro Miyake

掲載誌 : IEEE Transaction on Nuclear Science

DOI : <https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2839704>

【お問い合わせ先】

<研究に関すること>

九州大学大学院総合理工学研究院 教授 渡辺 幸信 (わたなべ ゆきのぶ)

電話 : 092-583-7601 FAX : 092-583-7601

Mail : [watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp](mailto:watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp)

大阪大学大学院情報科学研究科 教授 橋本 昌宜 (はしもと まさのり)

電話 : 06-6879-4520 FAX : 06-6879-4524

Mail : [hasimoto@ist.osaka-u.ac.jp](mailto:hasimoto@ist.osaka-u.ac.jp)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 研究員 安部 晋一郎 (あべ しんいちろう)

電話 : 029-282-5195 FAX : 029-282-6122

Mail : [abe.shinichiro@jaea.go.jp](mailto:abe.shinichiro@jaea.go.jp)

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授 三宅 康博 (みやけ やすひろ)

電話 : 029-284-4624 または 029-284-4952 FAX : 029-284-4899

Mail : [ymiyake@post.kek.jp](mailto:y Miyake@post.kek.jp)

<報道に関すること>

九州大学 広報室

電話 : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : [koho@jimu.kyushu-u.ac.jp](mailto:koho@jimu.kyushu-u.ac.jp)

大阪大学 情報科学研究科 庶務係

電話 : 06-6879-4299 FAX : 06-6879-4570

Mail : [jyouhou-syomu@office.osaka-u.ac.jp](mailto:jyouhou-syomu@office.osaka-u.ac.jp)

日本原子力研究開発機構 広報部 報道課

電話 : 03-3592-2346 FAX : 03-5157-1950

Mail : [tokyo-houdouka@jaea.go.jp](mailto:tokyo-houdouka@jaea.go.jp)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 社会連携部広報室

電話 : 029-879-6047 FAX : 029-879-6049

Mail : [press@kek.jp](mailto:press@kek.jp)

J-PARCセンター 広報セクション

電話 : 029-284-4578 FAX : 029-284-4854

Mail : [pr-section@j-parc.jp](mailto:pr-section@j-parc.jp)